

## ARBEITSPAPIERE

## WORKING PAPERS

NR. 7, JUNI 2011

ANALYSE UND GENERIERUNG VON  
STRASSENNETZWERKEN MITTELS  
GRAPHENBASIERTER METHODEN

FRAUKE ANDERS, REINHARD KOENIG

ISSN 2191-2416



**Frauke Anders, Reinhard Koenig**

Analyse und Generierung von Straßennetzwerken mittels graphenbasierter Methoden

Weimar 2011

Arbeitspapiere Informatik in der Architektur, Bauhaus Universität Weimar, Nr. 7

ISSN 2191-2416

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik in der Architektur

Belvederer Allee 1, 99421 Weimar

<http://infar.architektur.uni-weimar.de>

Titelbild: Jugendstil-Wendeltreppe im Hauptgebäude © Bauhaus-Universität Weimar

Redaktionelle Anmerkung:

Dr. Frauke Anders ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Informatik in der Architektur an der Bauhaus-Universität Weimar. Dr. Reinhard König ist Vertretungsprofessor der Professur Informatik in der Architektur an der Bauhaus-Universität Weimar.

Der Text ist im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsprojekts CoMStAR entstanden.

<http://infar.architektur.uni-weimar.de/service/drupal-cms/comstar>

# Analyse und Generierung von Straßennetzwerken mittels graphenbasierter Methoden

Frauke Anders<sup>1</sup>, Reinhard Koenig<sup>2</sup>

<sup>1</sup>frauke.anders@uni-weimar.de, <sup>2</sup>reinhard.koenig@uni-weimar.de

Professur Informatik in der Architektur

Fakultät Architektur, Bauhaus-Universität Weimar, Belvederer Allee 1, 99421 Weimar, Germany

## Abstract

Der vorliegende Beitrag ist in zwei thematische Teilebereiche gegliedert. Der erste Teil beschäftigt sich mit der Analyse von Graphen, insbesondere von Graphen, die Straßennetze repräsentieren. Hierzu werden Methoden aus der Graphentheorie angewendet und Kenngrößen aus der Space Syntax Methode ausgewertet. Ein Framework, welches basierend auf der Graphentheorie in Architektur und Stadtplanung Einzug gehalten hat, ist die Space Syntax Methode. Sie umfasst die Ableitung unterschiedlicher Kenngrößen eines Graphen bzw. Netzwerkes, wodurch eine Analyse für architektonische und stadtplanerische Zwecke ermöglicht wird.

Der zweite Teil dieses Berichts beschäftigt sich mit der Generierung von Graphen, insbesondere der von Straßennetzwerkgraphen. Die generativen Methoden basieren zum Teil auf den gewonnenen Erkenntnissen der Analyse von Straßennetzwerken. Es werden unterschiedliche Ansätze untersucht, um verschiedene Parameterwerte zur Generierung von Straßengraphen festzulegen. Als Ergebnis der Arbeiten ist ein Softwaretool entstanden, welches es erlaubt, auf Grundlage einer Voronoi-Tesselierung realistische Straßennetzwerkgraphen zu erzeugen.

**Keywords:** Graphentheorie; Straßennetzwerke; Softwareentwicklung.

## 1. Einleitung

Die hier beschriebenen Arbeiten und Ergebnisse sind im Rahmen des Forschungsprojektes CoMStAR<sup>1</sup> entstanden. Dieses von der DFG geförderte zweijährige Projekt befasste sich mit der Fragestellung einer sozial nachhaltigen Stadt- und Raumplanung. Aufgrund globaler Umstrukturierungen und Urbanisierung stehen Stadt- und Raumplanung vor der großen Herausforderung, nachhaltige Planungsstrategien anzubieten. Bisherige die Nachhaltigkeit fokussierende Entwicklungskonzepte wie z.B. Verdichtung, Mischnutzungen oder Polyzentralität resultieren vornehmlich aus ökonomischen und ökologischen Überlegungen. Das Ziel von CoMStAR bestand darin, die Wechselwirkungen zwischen räumlichen und sozialen Strukturen zu untersuchen und dadurch ein methodisches Instrumentarium zu Verfügung stellen, das die soziale Dimension der Nachhaltigkeit in der Planung zu berücksichtigen hilft, indem es eine Bewertung der aktuellen städtebaulichen Leitbilder hinsichtlich ihrer sozialen Nachhaltigkeit ermöglicht und darüber hinaus die Entwicklung neuartiger Planungskonzepte erlaubt. Graphenbasierte Analyseverfahren sind für diese Fragestellungen die Grundlage. Unter Hinzunahme kleinräumiger empirischer Daten konnten Effekte der baulichen Struktur auf die räumliche Organisation der Bevölkerung und vice versa untersucht werden. In diesem Beitrag wird insbesondere die graphenbasierte Analyse des Straßennetzwerkes zur Erklärung der sozialräumlichen Gliederung der Bevölkerung einer Stadt beschrieben. Es werden computerbasierte Methoden dargestellt, die es erlauben, typische Kenngrößen eines Netzwerkes zu ermitteln und mit Daten zur sozialräumlichen Bevölkerungsstruktur zu korrelieren. Diese Studie und die Entwicklung der hierfür notwendigen Software wurden im ersten Schritt durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen im zweiten Schritt in eine generative Software ein, welche als Vorschlagssystem für nachhaltige stadtplanerische Entwürfe dient.

## 2. Graphanalyse von Straßennetzwerken

### 2.1. Grundlagen der Graphentheorie

Die Topologie, d.h. die Nachbarschafts- bzw. Verbindungsstrukturen zwischen einzelnen Elementen, stellt neben der Geometrie einen Großteil der Information eines Satzes geografischer bzw. räumlicher Daten dar. Im Falle der zu untersuchenden Straßendaten sind topologische Eigenschaften des Netzwerkes ein wesentlicher Faktor, da nur diese Schlussfolgerungen über die Verbindungsmöglichkeiten, die Funktionsfähigkeit, die Ersatzwege, die

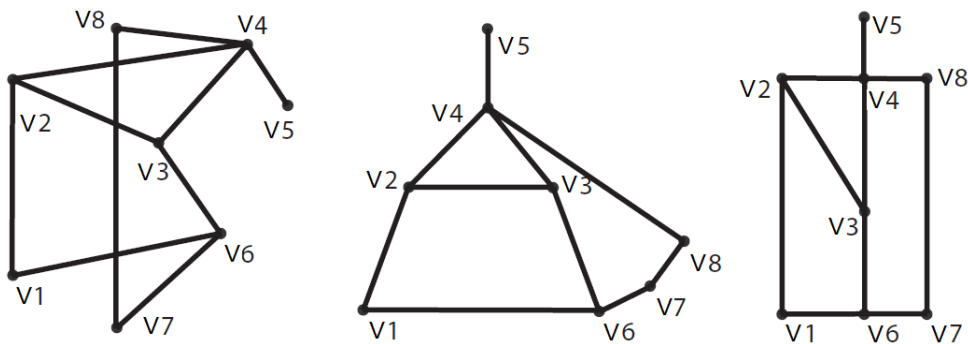
---

<sup>1</sup> CoMStAR: Computer-based methods for socially sustainable urban and regional planning

Effizienz der Verbindungen und über weitere Merkmale der Organisationsstruktur eines Straßennetzwerks zulassen (Anders, 2007).

Die topologischen Eigenschaften eines Straßennetzwerkes lassen sich hervorragend mittels Graphen darstellen. Eine Einführung in die Graphentheorie liefert u.a. Diestel (2005) und Jansen (2006). Topologien werden graphisch mit Knoten und Kanten dargestellt, wobei die Knoten (Nodes, Vertices) durch die Kanten (Edges) miteinander verbunden werden (Abb. 1).

Graphdefinition nach Diestel (2005): Ein Graph ist ein Paar der disjunkten Mengen  $G = (V, E)$ , so dass  $E \subseteq [V]^2$ . Die Elemente von  $V$  sind die Knoten (Vertices  $V$ ) von  $G$ , die Elemente von  $E$  sind die Kanten (Edges  $E$ ) von  $G$ .

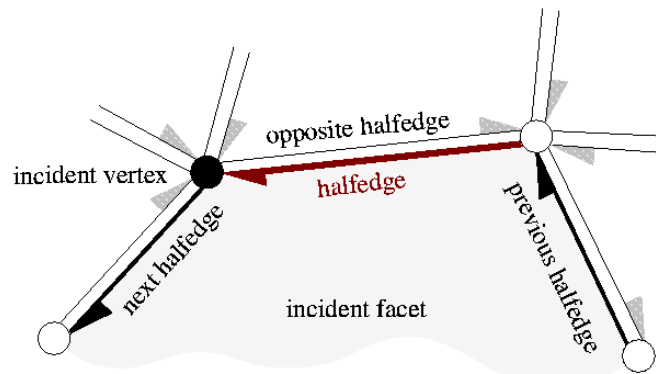


**Abb. 1:** Verschiedene Darstellungen desselben Graphen (entnommen aus Anders 2007).

Bei einem Graphen (im Sinne der Graphentheorie) kommt es nicht auf die Lage der Knoten und die Form der Kanten an (Abb. 1). Felsner (2003) führt zur Unterscheidung vom (topologischen) Graphen den geometrischen Graphen ein. „Ein geometrischer Graph ist ein topologischer Graph dessen Kanten gradlinig sind, das heißt die Kanten sind Strecken zwischen den Endpunkten“ (Felsner 2003).

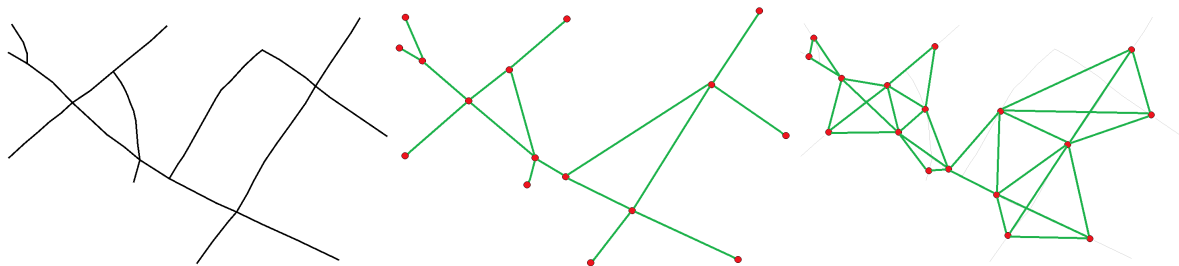
Wir nutzen in unseren Programmen einen ungerichteten Graphen. Dies bedeutet, dass die Richtung des Durchlaufs einer Kante von einem zum anderen Knoten keine Rolle spielt. Die Datenstruktur, mit der die Graphen repräsentiert werden, wird als doppelt verkettete Kantenliste (Halbkantenstruktur) aufgebaut. Bei der Halbkantenstruktur werden nicht Kanten, sondern Halbkanten gespeichert.

Halbkanten sind gerichtet; zwei zusammengehörige Halbkanten (Paar) zeigen in die entgegengesetzte Richtung und bilden eine Kante. Jede Kante ist von genau zwei Facetten (zu jeder Halbkante gibt es eine entgegengesetzte Halbkante) umgeben (Abb. 2). Der Vorteil der Halbkantenstruktur besteht darin, dass viele (Such)Operationen in konstanter Zeit ausgeführt werden können.



**Abb. 2:** Halbkantenstruktur im Graphen<sup>2</sup>.

In der von uns entworfenen Graphklasse<sup>3</sup> werden zusätzlich zur Topologie auch die geometrischen Verhältnisse der räumlichen Daten gespeichert, d.h. die Lage der Elemente, die von den Knoten und Kanten repräsentiert werden, ist bekannt. Somit wird das Straßennetz in seiner Gesamtheit, d.h. mit seinen wesentlichen topologischen und geometrischen Eigenschaften, mittels der Datenstruktur der von uns entworfenen Graphklasse abgebildet. Wir verwenden dafür die einfachste Interpretationsform, in welcher die Kreuzungspunkte der Straßen die Knoten sind, die Straßensegmente selbst die Kanten darstellen (Abb. 3 Mitte). Dadurch entspricht die Veranschaulichung des Graphen einer üblichen Stadtkarte.



**Abb. 3:** Zwei verschiedene Möglichkeiten der Überführung eines Straßennetzes in einen Graphen. Links: Straßennetzwerk - Ausgangsdaten. Mitte: Graph, in dem die Kreuzungen die Knoten und die Straßensegmente die Kanten des Graphen darstellen. Rechts: Graph, in dem die Straßen die Knoten des Graphen bilden, die Verbindungen der Straßen ergeben die Kanten des Graphen.

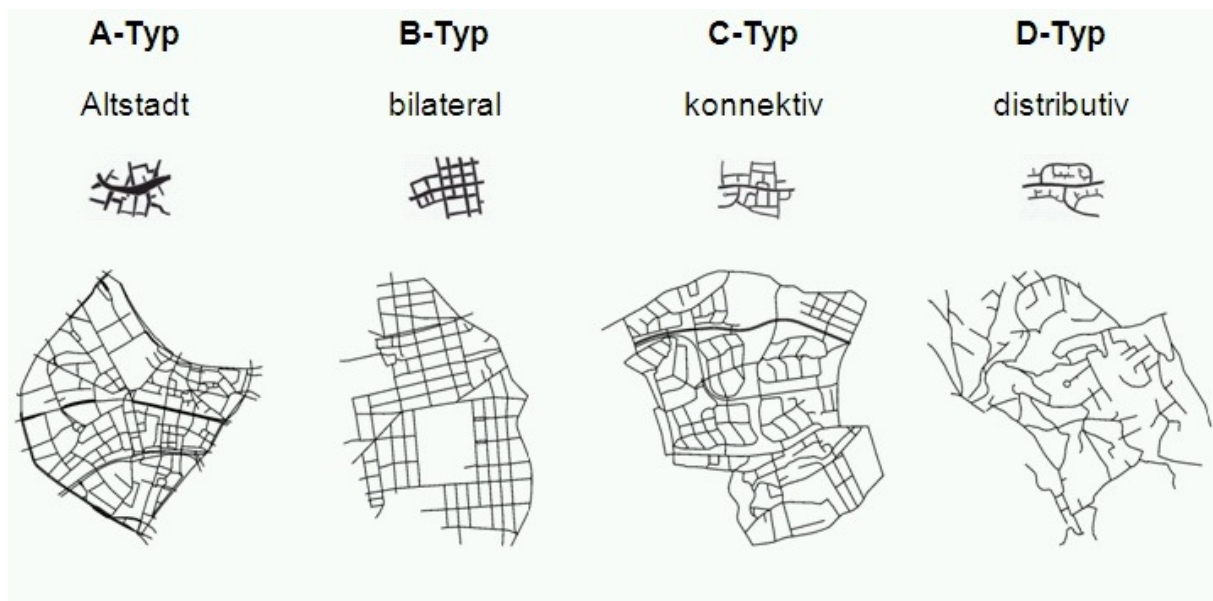
## 2.2. Untersuchung der Straßennetze

Nach den Beschreibungen von Marshall (2005) kann das Straßennetzwerk eines Stadtgebietes sehr unterschiedliche Ausprägungen haben. Typische Stadtstrukturen sind z.B. gitterförmige Anordnungen der Straßen, Baumstrukturen, radiale sowie hybride Formationen. Die topologischen Eigenschaften (z.B. Konnektivität, Tiefe) und die geometrischen Eigenschaften der Straßennetze (z.B. Regularität, Komplexität) differieren entsprechend der unterschiedlichen Ausprägung der Netzwerke. Gitterförmige Anordnungen sind z.B. hoch konnektiv, Baumstrukturen weisen sich dagegen durch eine große Tiefe aus. Abb. 4 liefert

<sup>2</sup> Bild entnommen aus: [http://www.cgal.org/Manual/latest/doc\\_html/cgal\\_manual/HalfedgeDS/Chapter\\_main.html](http://www.cgal.org/Manual/latest/doc_html/cgal_manual/HalfedgeDS/Chapter_main.html)

<sup>3</sup> Klasse (class) ist die zentrale Datenstruktur in C++. Sie kapselt zusammengehörige Daten und Funktionen vom Rest des Programmes ab. Sie ist das Herz der objektorientierten Programmierung. (Wikipedia)

anhand eigener ausgewählter Beispiele des Dresdener Straßennetzes einen Eindruck der oben beschriebenen Strukturen. Die Klassifizierung lehnt sich dabei an Marshall (2005) an, wobei wir den Altstadt-Typ (A) als hochkonnektive, stark verdichtete Mischform, den bilateralen Typ (B) als gitterförmige Struktur, den konnektiven Typ (C) als Mischform aus Gitter- und Baumstrukturen und den distributiven Typ (D) als baumförmige Formation interpretieren.



**Abb. 4:** Stadtgebietstypen nach Marshall (2005), klassifiziert in A, B, C, D-Typ (oben). Unterschiedliche Strukturen im Straßengraphen von Dresden - z. B. Altstadtbereich, Gitterstruktur, konnektive Mischform und baumförmige Erschließung (von links nach rechts, unten).

Die Untersuchung der dargestellten Eigenschaften der unterschiedlichen Straßenstrukturen (Abb. 4) ist Ziel der Graphenanalyse. Marshall (2005), Cardillo und Kollegen (2006) oder auch die Space Syntax Gruppe (Hillier et. al 1976, Hillier 2007, Rose 2008) stellen unterschiedliche Methoden zur Bestimmung diverser Merkmale von Straßengraphen vor. Folgende Kenngrößen werden von uns unter anderem betrachtet:

- Kontinuität (nach Marshall 2005) bedeutet in diesem Zusammenhang die Länge einer Route, gemessen in Straßenabschnitten zwischen einzelnen Kreuzungen, durch die die Route kontinuierlich verläuft.
- Konnektivität (nach Marshall 2005) ist die Anzahl der Routen, mit denen eine untersuchte Route verbunden ist.
- Tiefe (nach Marshall 2005) ist wiederum ein Maß für die Distanz einer Route von einer festgelegten Basisroute.
- Regularität ist ein Maß für die (geometrische) Regelmäßigkeit der Straßenanordnungen. Gitterformen sind z.B. sehr regelmäßig.
- Gesamtlänge des Straßennetzes als Maß für die Dichte der Bebauung.

- Der durchschnittliche Knotengrad des Straßengraphen beinhaltet Aussagen über die Vernetzung der Straßen. Als Knotengrad bezeichnet man die Anzahl der Kanten, die diesen Knoten mit einem anderen Knoten verbinden (Anzahl der abgehenden Kanten). Es werden insbesondere zwei unterschiedliche Typen von Graphen unterschieden: sogenannte „Random Graphs“ zum einen und „Scale-free Graphs“ zum anderen. Straßennetzwerke stellen „Random Graphs“ dar. Bei diesen Graphen liegt eine Normalverteilung der Knotenanzahl in Bezug zum Knotengrad vor. D.h. wir können annehmen, dass der typische Knotengrad bei drei oder vier Kanten pro Knoten liegt. Es existieren wesentlich weniger Knoten mit einem höheren oder niedrigeren Knotengrad. Im Gegensatz dazu präsentiert sich der „Scale-free Graph“ als ein Graph, bei dem einzelne Knoten einen sehr hohen Knotengrad aufweisen und sogenannte Hubs (zentrale Verbindungsknoten) darstellen. Ein typisches Beispiel für „Scale-free“ Netzwerke sind Flugroutenpläne oder das Internet. Beim Beispiel des Straßennetzes sind gitterförmige Anordnungen eher durch einen mittleren Knotengrad von vier geprägt, baumförmige Anordnungen besitzen eher einen durchschnittlichen Knotengrad von drei.
- Zur Untersuchung von Nachbarschaftsbeziehungen betrachten wir für ungerichtete Straßengraphen den zugehörigen Nachbarschaftsgraphen und dessen Ausprägungen (z.B. Knotengrad, Kantenlänge). In Nachbarschaftsgraphen werden ähnliche oder benachbarte Punkte mit einer Kante verbunden. Die vielfältigen Möglichkeiten der Definition von „benachbart“ führen zu mehreren verwandten Graphen von denen die bekanntesten z.B. die Delaunay-Triangulation, der minimal spannende Baum oder der K-Nächster Nachbar Graph sind. Wir betrachten die Facetten (von Straßen umschlossene Parzellen bzw. Baublöcke) als Knoten des Nachbarschaftsgraphen und stellen zwischen benachbarten, d.h. durch dieselbe Straße getrennten Parzellen die topologische Beziehung (Kante) her. Es werden also die Relationen zwischen räumlich benachbarten Baublöcken im Nachbarschaftsgraph abgebildet.
- Die Richtungsvarianz der Straßen ist ein Maß für die Regelmäßigkeit der Straßenanordnung.
- Der Anteil an Gitterstrukturen im Straßennetzwerk ist ein Maß für dessen Regelmäßigkeit.
- Zentralität (oder nach der Space Syntax Theorie auch Integration) misst die topologische Entfernung jedes Segments zu allen anderen (oder zu allen Segmenten, die sich innerhalb eines festgelegten Radius befinden) unter Berücksichtigung der Winkel zwischen den Segmenten. Der Zentralitätsgrad spiegelt die „relative Erreichbarkeit“ wider und ist somit zum Beispiel hilfreich bei der Platzierung von Einzelhandelsein-



richtungen in einer Nachbarschaft oder bei der Definition von Zentren (Rose et al. 2008).

- Durchgangspotential (oder nach der Space Syntax Theorie auch Choice) misst die Häufigkeit, mit der ein Segment Teil des günstigsten Weges zwischen allen möglichen Paaren von Start- und Zielorten ist (unter Berücksichtigung des Winkels zwischen den Wegsegmenten). Dieser Wert gibt das Durchgangspotenzial eines Segments innerhalb eines festgelegten Radius wieder (Rose et al. 2008).

Um nun die oben beschriebenen Kenngrößen für die unterschiedlichen Straßennetzwerktypen ermitteln zu können, benötigt man Ausschnitte aus einem Straßennetz. Eine Herangehensweise ist die manuelle Selektion von Teilgebieten der Stadt hinsichtlich homogener Strukturbereiche und eine anschließende Analyse. Eine Automation der Selektion und Abgrenzung solcher Stadtstrukturen konnte für gitterförmige Gebiete erreicht werden (Anders 2007). Zukünftig sollen auch andere Typen von Straßenanordnungen mithilfe der von uns entwickelten Software innerhalb eines gesamten Straßennetzwerks detektiert und abgegrenzt werden können. Hierfür ist die weitere Erforschung von Kenngrößen der variierenden Graphstrukturen essentiell.

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projekts CoMStAR haben wir eine neue Methode der Abgrenzung unterschiedlicher Stadtgebiete gewählt. Für das Stadtgebiet von Dresden liegen uns soziale Daten in Form von Milieudaten vor. D.h. die Bevölkerung wird in zehn unterschiedliche Milieugruppen entsprechend diverser statistischer Daten und Fragen des Lebensstils klassifiziert. Die Milieuklassen sollen in diesem Bericht nicht weiter kommentiert werden, können aber unter <http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html> nachgelesen werden. Die Milieudaten liegen uns als „Datenpunkte“, also räumlich (adressgenau) vor, d.h. zu jeder Wohnadresse existiert ein Datenpunkt, welchem eine Milieuklasse zugeordnet ist.

Diese Milieupunkte wurden zunächst geclustert (HALL et al. 2009). Als Attribute für die Clusterbildung haben wir ausschließlich die Lage der Milieupunkte und ihre Klassifizierung in die 10 Milieuklassen benutzt, d.h. räumlich naheliegende Punkte desselben Milieus wurden zu Clustern zusammengefasst. Die zehn Milieuklassen wurden dabei gleichwertig ohne Gruppenbildung behandelt, d.h. Punkte, die derselben Milieuklasse angehören werden möglichst in Clustern zusammengefasst, Punkte verschiedener Milieuklassen werden möglichst in unterschiedliche Cluster getrennt. Als Ergebnis erhält man Cluster der Milieupunkte. Das Resultat dieser Clusterbildung deckt sich erstaunlich gut mit den administrativen

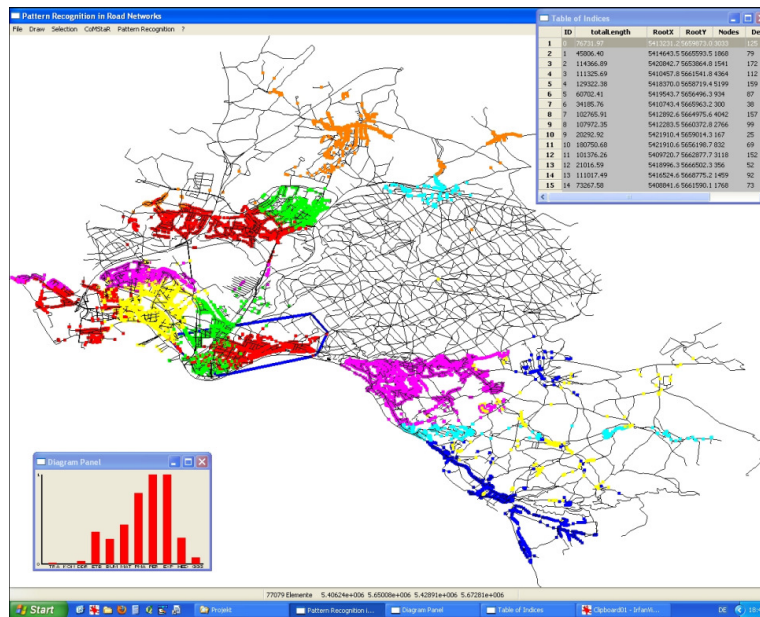
Grenzen der Dresdner Stadtteile (Abb. 5 und Abb. 6). Eine genauere Beschreibung findet sich in Anders et al. (2010).

Die Verbindung der Milieu-Datenpunkte mit dem Straßengraphen wurde analog zur Anbindung von Gebäudezentroiden an ein Straßennetzwerk automatisiert durchgeführt. Der hierfür entwickelte Programmcode basiert auf der Suche nach der kürzesten Distanz zwischen einem (Milieu-, Gebäude-)Punkt und allen vorhandenen Strecken (Straßen). Somit wird jeder Punkt an die nächstliegende Straße rechtwinklig angeschlossen. Alternativ können auch semantische Daten bezüglich Straßennamen bzw. -kennzeichen genutzt werden, so dass der Punkt an jene Straße angebunden wird, welche dieselben Bezeichner aufweist. Durch die Anbindung der Milieupunkte an den Straßengraphen können die Sozialdaten und die Straßennetzwerksstruktur in einem Graphen abgebildet und ausgewertet werden.

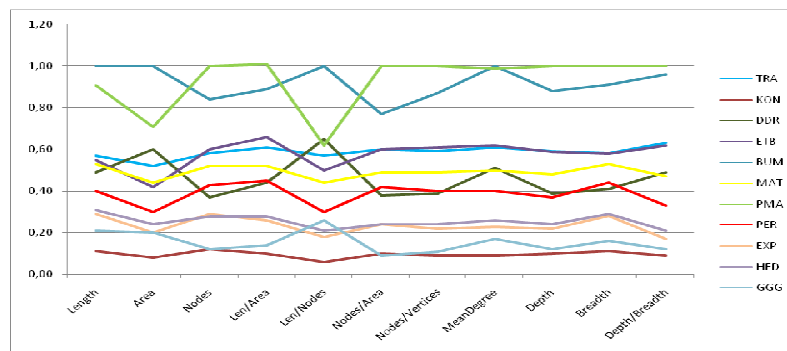
Die oben beschriebenen Cluster der Milieupunkte wurden anschließend genutzt, um Subgraphen aus dem Gesamtstraßennetzwerk auszuschneiden. Dieses ist ein NP-schweres Problem. Der Programmcode hierfür stützt sich auf das Verfahren nach Dijkstra (kürzeste-Wege-Suche) und wird für jedes Cluster einzeln durchgeführt. Das Programm setzt sich aus folgenden Hauptschritten zusammen:

- Finden der kürzesten Wege (shortest paths) zwischen einem Startknoten und allen anderen Punkten des Clusters.
- Variierung des Startknotens, so dass jeder Clusterpunkt einmal Quellknoten ist.
- Aufbau des Subgraphen mit allen Kanten (Straßen), welche mindestens einmal als kürzester Pfad durchlaufen werden.
- Anschließende Hinzunahme von Kantenverbindungen zum Subgraphen, welche zwar nicht als kürzeste Pfade genutzt wurden, sich aber innerhalb der konvexen Hülle der Clusterpunkte befinden. Dies sind häufig Querverbindungen, an welchen keine Milieupunkte liegen, so dass hier keine Quellknoten vorhanden sind.

Auf diese Weise konnten Subgraphen ermittelt werden, welche das jeweilige Straßennetz im Gebiet eines Milieucusters sehr gut repräsentieren. Diese Subgraphen wurden nun in zweierlei Hinsicht untersucht (Abb. 5). Zum ersten wurden die oben beschriebenen Kenngrößen (siehe Seite 5 bis 7) ermittelt und diese mit den Milieudaten korreliert (Abb. 6). Hierfür wurden die Kenngrößen pro Subgraphen einzeln ermittelt. Entsprechend des prozentualen Anteils eines Milieus pro Subgraphen (welcher ja einem Cluster entspricht) wurden diese Kenngrößen einem Milieu gewichtet zugeordnet. Anschließend wurden alle Ergebnisse der einzelnen Subgraphen summiert und normiert, so dass das Diagramm in Abb. 6 das gesamte Straßennetz von Dresden repräsentiert.



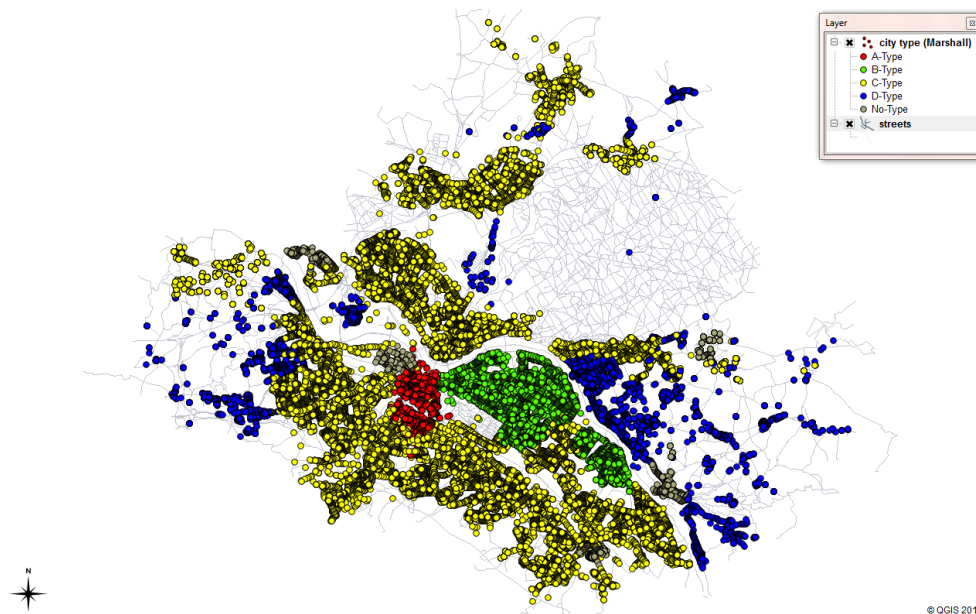
**Abb. 5:** Tool zur Verknüpfung der Milieupunkte mit dem Straßengraphen, Bestimmung von Subgraphen anhand der Cluster der Milieupunkte und graphenanalytischen Auswertung (Bestimmung von Kenngrößen) der Subgraphen.



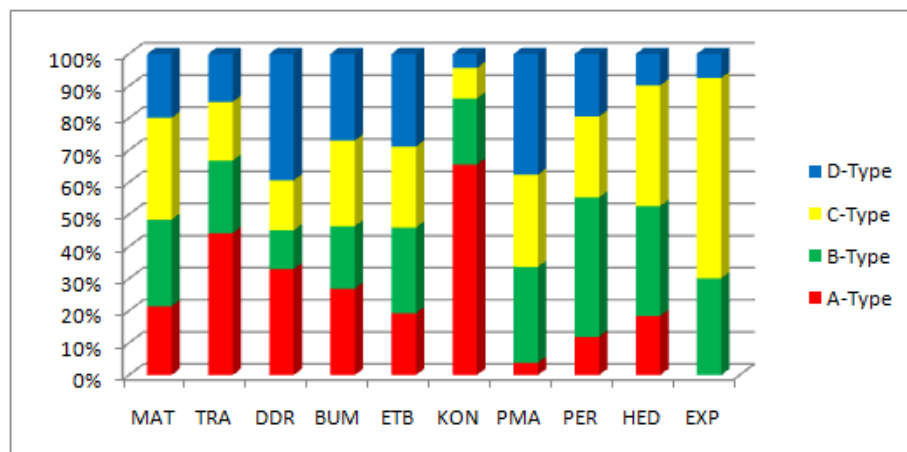
**Abb. 6:** Korrelation der Milieudaten mit den Kenngrößen des Straßengraphen. Jede Kurve repräsentiert die Ausprägungen der Kenngrößen eines Milieus.

Eine weitere Auswertung erfolgte mithilfe der bestimmten Kenngrößen der Subgraphen, indem die Subgraphen vier unterschiedlichen Stadtgebietstypen zugeordnet wurden (Abb. 7). Mittels überwachter Klassifizierung auf Grundlage aller oben beschriebenen Kenngrößen (siehe Seite 7 bis 9) der Subgraphen konnte eine Typifizierung in A-Typ (Altstadt), B-Typ (bilaterale bzw. gitterförmige Anordnungen), C-Typ (konnektive Anordnungen bzw. Vorstädte) und D-Typ (dörflich strukturierte Gebiete bzw. Außenbereich) vorgenommen werden. Die Überwachung der Klassifizierung erfolgte insofern, als dass idealtypische Straßennetze und die zugehörigen Musterstraßengraphen der vier verschiedenen Typen entworfen wurden und für diese Musterstraßengraphen die Kenngrößen bestimmt wurden. Aufgrund dieser Musterkenngrößen konnten die Abgrenzungen zwischen den vier Typen festgelegt werden. Anschließend an die Typifizierung jedes einzelnen Subgraphen konnten den innerhalb des Gebiets der Subgraphen lokalisierten Milieupunkten ebenfalls der klassifizierte Stadtgebietstypus zugeordnet werden (Abb. 7). Aus der Summation aller Subgra-

phen ergibt sich die prozentuale Verteilung der Milieus bezüglich dieser Stadtgebietstypen. Sie ist in Abb. 8 ersichtlich.



**Abb. 7:** Klassifizierung des Straßennetzes in vier verschiedene Stadttypen: A-Typ (Altstadt, rot), B-Typ (bilaterale bzw. gitterförmige Anordnungen, grün), C-Typ (konnektive Anordnungen bzw. Vorstädte, gelb) und D-Typ (dörflich erschlossene Gebiete bzw. Außenbereich, blau). Die Klassifizierung erfolgte anhand der Subgraphen; die Punkte stellen einzelne Gebäudeadressen dar.



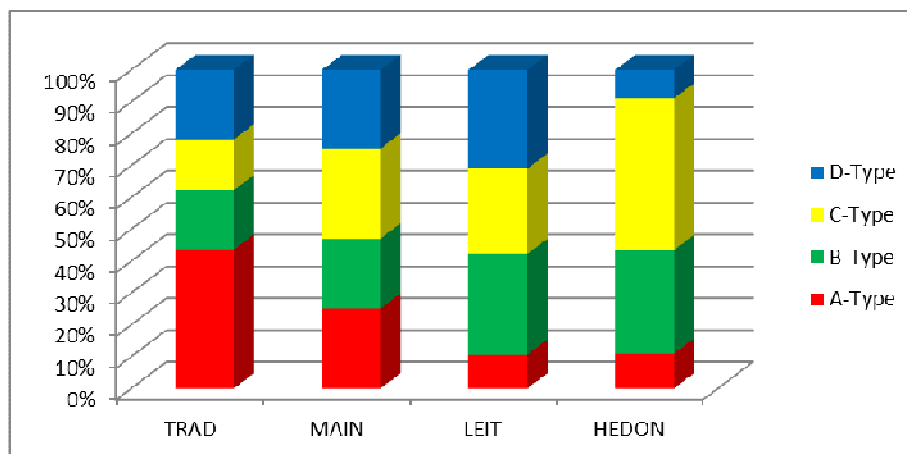
**Abb. 8:** Verteilung der Milieus in den in Abb. 7 beschriebenen Stadtgebietstypen. Die Abkürzungen der Milieunamen (x-Achse) entsprechen den Bezeichnungen der 10 Milieuklassen (<http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html> - Stand 2009).

Eine inhaltliche Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenspiels der sozialen Gegebenheiten und der infrastrukturellen Randbedingungen erfolgt ausführlich im Abschlussbericht des Forschungsprojektes.

Für eine Interpretation dieser Ergebnisse fassen wir analog zu den Definitionen der Sinus-Milieus diese in vier große Gruppen zusammen.

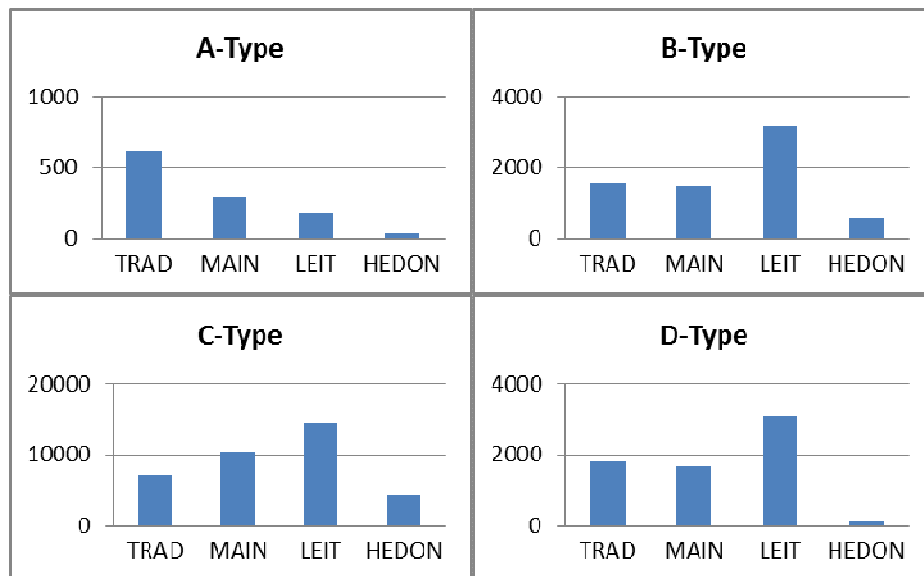
- **Traditionelle Milieus:** Konservative, Traditionsverwurzelte, DDR-Nostalgische
- **Mainstream-Milieus:** Bürgerliche Mitte, Konsum-Materialisten
- **Gesellschaftliche Leitmilieus:** Etablierte, Postmaterielle, Moderne Performer
- **Hedonistische Milieus:** Experimentalisten, Hedonisten

Abb. 9 zeigt die prozentuale Verteilung der in die vier Milieugruppen zusammengefassten Daten aus Abb. 8 bezüglich der Stadtgebietstypen. Abb. 10 zeigt die selben Daten – aufbereitet als absolute Zahlen (Anzahl der Haushalte). Es ist zu erkennen, dass z.B. im A-Typ die Traditionalisten deutlich überrepräsentiert sind. Unter dem Augenmerk, dass diese sogar nur die drittstärkste Fraktion in absoluten Haushaltszahlen darstellen, ist der Anteil im A-Typ umso herausstechender (siehe auch Abb. 11).



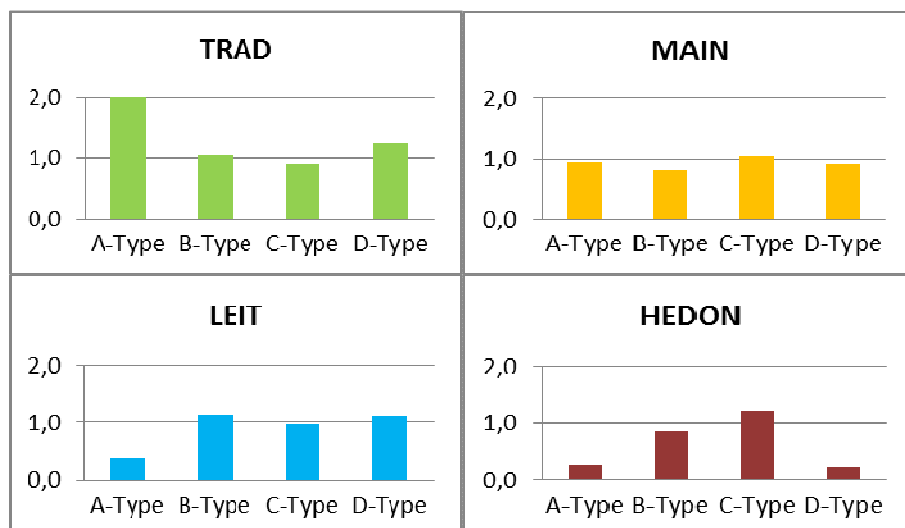
**Abb. 9:** Verteilung der Milieus in den in Abb. 7 beschriebenen Stadtgebietstypen. Die Abkürzungen der Milieunamen (x-Achse) entsprechen den Bezeichnungen der vier Milieugruppen (<http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html> - Stand 2009).

Im Gegensatz dazu sind die sogenannten Leitmilieus im A-Typ deutlich unterrepräsentiert. Man kann also daraus schließen, dass Traditionalisten bevorzugen, sich in einem Altstadtgebiet bzw. altstadtähnlichen Bebauungsgebieten anzusiedeln, wohingegen diese Gebiete von den Leitmilieus gemieden werden. Bezüglich der restlichen drei Stadtgebietstypen bestehen seitens der Leitmilieus keine besonderen Vorlieben – ganz im Widerspruch zu unserer landläufigen Annahme, dass die „Etablierten“ unserer Gesellschaft hauptsächlich in den baumförmig erschlossenen, äußeren Bereichen einer Stadt zu finden seien. Weiterhin auffällig ist die Ablehnung der in A- und D-Typ klassifizierten Gebiete seitens der hedonistischen Milieus. Sie „tummeln“ sich am liebsten im C-Typ, d.h. in vorstadtähnlichen Gebieten. Eine weitere Erkenntnis besteht darin, dass der Mainstream tatsächlich seinem Namen gerecht wird und in allen vier unterschiedlichen Stadtgebietstypen gleichermaßen durchschnittlich oft angesiedelt ist. Besonders deutlich wird dies durch die Darstellung wie sie in Abb. 11 gewählt wurde.



**Abb. 10:** Verteilung der Milieus in den in Abb. 7 beschriebenen Stadtgebietstypen (Anzahl der Haushalte). Die Abkürzungen der Milieunamen (x-Achse) entsprechen den Bezeichnungen der 4 Milieugruppen (<http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html> - Stand 2009).

Abb. 11 zeigt die Verteilung der Haushalte in den vier Stadtgebietstypen pro Milieu. Der Wert 1,0 repräsentiert dabei die mittlere Norm. Werte darüber oder darunter verdeutlichen ein überdurchschnittliches oder unterdurchschnittliches Vorkommen innerhalb des jeweiligen Stadtgebietstypen.



**Abb. 11:** Verhältnismäßige Aufteilung der zu der jeweiligen Milieugruppe gehörigen Haushalte bezüglich der in Abb. 7 beschriebenen Stadtgebietstypen.

### 3. Generierung von Graphen

#### 3.1. Einführung

Die meisten Veröffentlichungen zum Thema Graphgenerierung behandeln eher das Problem der Visualisierung von Graphen (z.B. mit der Software Graphviz<sup>4</sup>). Die zu visualisierenden Graphen werden dabei bereits explizit mithilfe der Adjazenzmatrix bzw. Adjazenzzliste<sup>5</sup> beschrieben, d.h. die Knoten und deren Verbindungen (Kanten) sind bereits vorgegeben bzw. bekannt.

Im Gegensatz dazu besteht die hier untersuchte Problematik darin, (Straßen-)Graphen automatisiert zu generieren, d.h. eine für Straßennetzwerke typische Topologie zu entwerfen und gleichzeitig die dazugehörige Geometrie zu erzeugen. Diese sollen in einem iterativen Prozess entworfen werden und durch Parametrisierung gesteuert werden können.

Für die Generierung von Straßennetzwerken bzw. deren Graphen gibt es unterschiedliche Ansätze. Sun und Kollegen (2002) beschreiben ein Verfahren, welches auf typischen Straßenmustern (Templates) wie z.B. Gitterstrukturen oder radialen Strukturen basiert. Auf dieser Grundlage werden die Parametrisierungen zur Generierung der Netzwerke abgeleitet. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Parish und Müller (2001) bei ihrer „City Engine“. Das grundlegende Prinzip besteht hier in der Parametrisierung von Lindenmayer-Systemen (L-Systemen). Beiden Ansätzen gemein ist jedoch, dass sie Rasterbilder (z.B. Karten über die Populationsdichte oder Landnutzungskarten) zur Steuerung des Generierungsprozesses zugrunde legen.

Im Rahmen des CoMStaR-Projekts wurden zwei verschiedene Methoden zur Generierung von Straßennetzwerken umgesetzt, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Jede Methode wurde anhand eines Softwaremusters umgesetzt und getestet.

#### 3.2. Generierung von Erschließungsnetzwerken mittels direkter Raumunterteilung

Die erste hier vorgestellte Methode beschreibt die geometrische Unterteilung eines Raums, bzw. einer Fläche. Das Ziel besteht darin, möglichst realistische Strukturen zu generieren, von denen entsprechende Erschließungsgraphen abgeleitet werden können. Im Folgenden werden drei verschiedene Varianten zum Erreichen dieses Ziels vorgestellt.

---

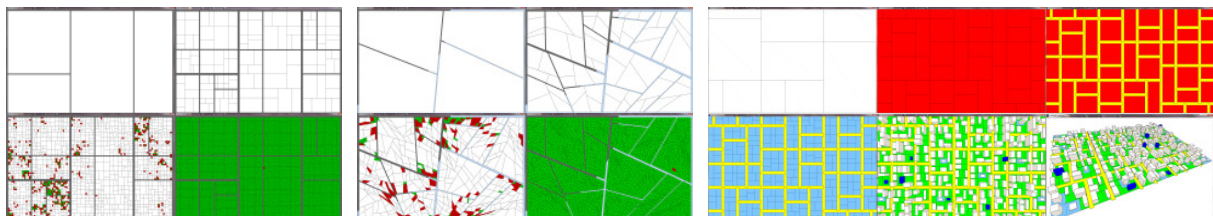
<sup>4</sup> <http://www.graphviz.org/>

<sup>5</sup> Für die Repräsentation von Graphen im Computer gibt es im Wesentlichen zwei gebräuchliche Formen, die Adjazenzmatrix und die Adjazenzzliste. Ein Graph mit  $n$  Knoten kann durch eine  $n \times n$ -Matrix repräsentiert werden. Dazu nummeriert man die Knoten von 1 bis  $n$  durch und trägt in die Matrix die Beziehungen der Knoten zueinander ein (1=Kante, 0=keine Kante). Die Adjazenzzliste wird in ihrer einfachsten Form durch eine einfach verkettete Liste aller Knoten des Graphen dargestellt, wobei jeder Knoten eine Liste aller seiner Nachbarn besitzt. (siehe [http://de.wikipedia.org/wiki/Repräsentation\\_von\\_Graphen\\_im\\_Computer](http://de.wikipedia.org/wiki/Repräsentation_von_Graphen_im_Computer))

Bei der ersten Untersuchung wird das betrachtete Gebiet durch ein Rechteck vorgegeben. Dieses Rechteck wird iterativ nach variablen Verhältnissen unterteilt, so dass nach der Teilung eines Rechtecks zwei neue entstehen, die wiederum weiter geteilt werden können. Bei den in Abb. 12 dargestellten Beispielen wurde der "Goldene Schnitt" als Unterteilungsverhältnis gewählt. Zwischen den ersten mit dieser Methode erzeugten Sub-Rechtecken werden zur Repräsentation von Verkehrsadern Abstände erzeugt, indem die jeweiligen Rechtecke kleiner skaliert werden. Diese Rechtecke werden nun so lange unterteilt, bis eine Mindestgröße erreicht ist (Abb. 12 links, grün markierte Rechtecke). Die rot markierten Rechtecke in Abb. 12 links zeigen an, dass die Mindestgröße bei der nächsten Teilung erreicht wird. Als Ergebnis entsteht ein abstraktes Muster, welches in seinen wesentlichen Eigenschaften mit einer Siedlungsstruktur verglichen werden kann.

Die Mechanismen der zweiten Untersuchung sind im Wesentlichen die gleichen wie bei der ersten Untersuchung. Der Unterschied zwischen beiden besteht darin, dass bei der zweiten das Ausgangsrechteck nicht so unterteilt wird, dass neue Rechtecke entstehen. Stattdessen entstehen Vierecke mit verschiedenen Seitenlängen (Abb. 12 Mitte). Die im Ergebnis entstehenden unregelmäßigen Flächen weisen teilweise sehr spitze Winkel auf, so dass die resultierenden Muster für die Repräsentation von Siedlungsstrukturen als nicht so geeignet erscheinen, wie jene der ersten Untersuchung.

Bei der dritten Untersuchung wurde das Programm aus der ersten Untersuchung weiterentwickelt. Das System wurde so angepasst, dass bei einer bestimmten Größe der Rechtecke die HAUPTerschließungswege eingefügt werden. Die durch die Straßen getrennten Rechtecke werden als Baufelder interpretiert und weiter in einzelne Parzellen bis zu einer Mindestgröße unterteilt. Anschließend wird jede Parzelle mit einem Gebäude bebaut, wobei die Nutzungsdichte festgelegt werden kann (Abb. 12 rechts). Bei diesem Muster sind alle hier relevanten geometrischen Elemente (Straßen, Parzellen, Gebäude) explizit repräsentiert, so dass eine Koppelung an graphenbasierte Methoden möglich ist.



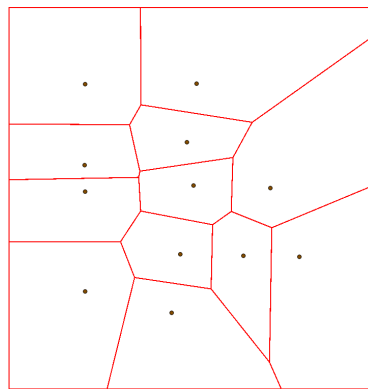
**Abb. 12:** Links: Erzeugung von orthogonalen Mustern durch „Goldenen Schnitt“. Mitte: Erzeugung eines Viereck-Musters. Rechts: Muster zur Zerlegung des Raumes und Klassifizierung der Straßen. Von oben links nach unten rechts sind jeweils verschiedene Zwischenstufen bei der Entwicklung des abstrakten Musters dargestellt.



Die drei in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen basieren auf einer Methode zur geometrischen Unterteilung einer Fläche auf Basis einfacher Regeln. Aus der erzeugten Geometrie ergeben sich die Raumrelationen, welche in einen Erschließungsgraphen der entsprechenden Siedlungsstruktur überführt werden können, indem die Kreuzungspunkte der Straßen als Knoten und die Straßensegmente als Kanten des Graphen interpretiert werden.

### 3.3. Generierung von Erschließungsnetzwerken mittels Voronoi-Tessellierung

Die zweite verwendete Methode zur geometrischen Raumzerlegung ist die Voronoi-Tessellierung, deren Ergebnis sogenannte Voronoi-Diagramme sind. Voronoi-Diagramme (Abb. 13, auch als Thiessen-Polygone bezeichnet) zerlegen einen Raum auf Basis einer vorgegebenen Menge von Punkten in Regionen. Die Lage dieser Punkte, welche jeweils die Zentren einer Region darstellen, bestimmt die geometrische Ausprägung der Raumzerlegung. Es werden diejenigen Raumpunkte einer bestimmten Voronoi-Region zugeordnet, die näher an dem Zentrum dieser Region liegen, als an jedem anderen Zentrum. Das Voronoi-Diagramm, d.h. die Grenzen zwischen diesen Regionen, wird durch alle Punkte, die mehr als ein nächstgelegenes Zentrum besitzen, bestimmt<sup>6</sup>. Zur vektoriellen Bestimmung von Voronoi-Diagrammen ist der bekannteste Algorithmus das Sweep-Line-Verfahren nach Steven Fortune<sup>7</sup>.



**Abb. 13:** Voronoi-Diagramm.

Die Idee der hier vorgestellten Methode besteht darin, die Zentren der Voronoi-Regionen als Gebäude, Mittelpunkte von Grundstücken oder auch Zentren von Baublöcken zu betrachten. Damit lässt sich auf eine einfache Weise die Dichte des zu erzeugenden Straßennetzes steuern und somit ein dem jeweiligen Anwendungsfall angepasstes, maßstabsge-

<sup>6</sup> Ein sehr anschauliches Applet ist unter <http://www.pi6.fernuni-hagen.de/GeomLab/VoroGlide/> zu finden (zuletzt besucht am 23.05.2011)

<sup>7</sup> Fortune's algorithm: <http://www.diku.dk/hjemmesider/studerende/duff/Fortune/> (zuletzt besucht am 23.05.2011)

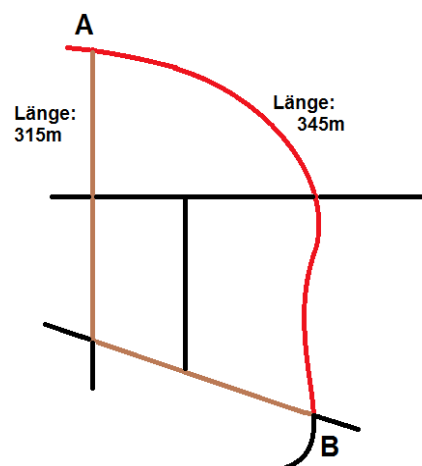
rechtes Straßennetz verwirklichen. Bekannte Beispiele hierfür sind u.a. die Arbeiten zu „Kaisersrot“ (Fritz und Braach 2005, Fritz 2002).

Allerdings entspricht das typische Erscheinungsbild eines Voronoi-Diagrammes nicht den üblichen Charakteristiken eines Straßennetzes. Straßen verlaufen gewöhnlich geradlinig - auch an Kreuzungen bzw. Einmündungen anderer Straßen. Richtungsänderungen außerhalb von Kreuzungen erfolgen meist sanft, d.h. nicht knickartig sondern in Form einer Kurve mit konstanter Krümmung (Kreisabschnitt) oder stetig wechselnder Krümmung (Klothoidenabschnitt). Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus einem Voronoi-Diagramm ein angepasstes Straßennetzwerk ableitet, indem er die Kanten des Voronoi-Diagramms glättet bzw. begradigt (Abb. 14).

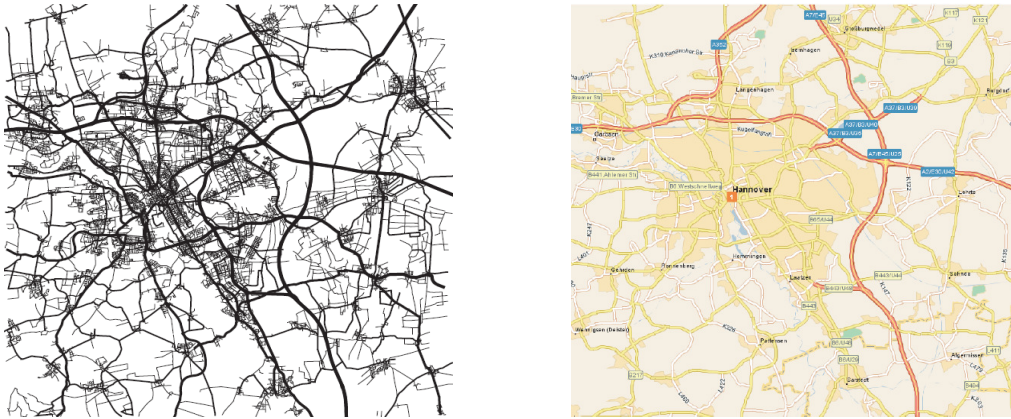
Im Anschluss an diesen Algorithmus wird ein weiterer Schritt zur Erzeugung des Straßennetzes durchlaufen. Bei diesem spielt die Geradlinigkeit der Kantenverläufe eine wichtige Rolle. Da, wie oben erwähnt, Straßen einen eher geradlinigen Verlauf aufweisen, werden aus den begradigten Voronoi-Kanten sogenannte „Strokes“ (aus dem engl., Pinselstriche) erzeugt (Thomson & Richardson 1999). Strokes spiegeln das Prinzip der „guten Fortsetzung“ einer Straße wider ('good continuation' principle). Es besagt, dass Straßen einen möglichst geradlinigen Verlauf haben, auch über Kreuzungen hinweg. Dieses Prinzip wird auch bei der Space Syntax Theorie zur Bestimmung des Durchgangspotentials (choice) verwendet. Für die Ermittlung des Durchgangspotentials werden die Winkel zwischen den Wegsegmenten als Maß in die Berechnung des kürzesten Weges einbezogen. Man geht davon aus, dass Routen umso häufiger durchlaufen werden, desto geringer deren Summe an Winkeländerungen ist. D.h. eine geradlinige Route hat ein wesentlich höheres Durchgangspotential als eine, deren Verlauf viele Knicke beinhaltet. Die metrische Länge der Route spielt bei der Berechnung des Durchgangspotentials keine Rolle. In Abb. 15 ist die Route mit dem höchsten Durchgangspotential (Stroke) rot markiert. Obwohl sie länger ist als die braune Route, ist ihr Durchgangspotential größer, da sie weniger Knickpunkte und damit weniger Richtungsänderungen aufweist. Abb. 16 links zeigt beispielhaft am Straßennetz von Hannover die vorhandenen Strokes sowie zum Vergleich Abb. 16 rechts eine Übersichtskarte mit klassifizierten Straßen.



**Abb. 14:** Erzeugung eines Straßennetzes aus einem Voronoi-Diagramm. Links oben: Zufällig platzierte Punkte. Rechts oben: Zu den Punkten gehöriges Voronoi-Diagramm. Links unten: Kanten des Voronoi-Diagramms nach Begradigung. Rechts unten: Automatische Ableitung eines potentiellen Straßennetzes (die Dicke der gelben Linien spiegelt die Wertigkeit der Straße wider).



**Abb. 15:** Beispiel für einen Stroke (rot), ermittelt aufgrund der geringsten Winkeländerungen.



**Abb. 16:** Straßennetzwerk der Stadt Hannover. Links: Ermittelte Strokes werden durch dicke Linien wiedergegeben. Rechts: Vergleich mit einer Übersichtskarte von Hannover mit klassifiziertem Straßennetz (Abb. aus Anders 2007).

Auf Grundlage des Durchgangspotentials der Straßen können Routen durch die begradtigten Voronoi-Kanten festgelegt werden, welche zur impliziten Klassifizierung der Straßensegmente dienen. Für das in diesem Abschnitt beschriebene Verfahren wurde ein Softwaremuster auf Basis einer Windows Forms Applikation entwickelt (Abb. 17).



**Abb. 17:** Screenshot des Softwaremusters zur Generierung von Straßennetzwerken.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In Architektur und Stadtplanung werden häufig Verfahren benötigt, um Räume zu unterteilen. Diese Räume können geographischer Natur sein, wie z.B. Stadtgebiete oder kleinräumiger wie z.B. das Innere von Gebäuden. In diesem Zusammenhang wurde mit dem vorliegenden Beitrag gezeigt, dass Algorithmen aus den Bereichen der Computational Geometry, der Graphentheorie und des Clusterings erfolgreich zur Unterteilung von Räumen angewendet werden können.

Das Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen war die Analyse und Generierung von Graphen, speziell von Straßennetzwerksgraphen. Mittels graphenbasierter Methoden wurden zunächst die topologischen sowie geometrischen Verhältnisse von realen Straßengraphen untersucht. Hierfür wurde ein geometrischer Graph genutzt. Die Korrelation mit den uns vorliegenden sozialen Daten (Milieupunkte) und die daraus resultierenden Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass es einen Zusammenhang zwischen der lokalen Ausprägung des Straßennetzes und dem lokal ansässigen Milieu gibt. Allerdings haben wir auch festgestellt, dass dieser Zusammenhang nicht gleichmäßig stark bei allen Milieus ausgeprägt ist.

Durch die Analyse von vorhandenen Straßennetzwerken wurden Erkenntnisse über die Anordnung von Straßen, die topologischen und geometrischen Eigenschaften von Netzwerken und das Zusammenspiel mit sozialen Faktoren der Bevölkerung (auf Basis der Milieudaten) gewonnen. Das im Rahmen der vorliegenden Studie gewonnene Verständnis für die Organisationseinheit „Straße“ wurde genutzt, um Fragestellungen bezüglich der Neuplanung eines Stadtgebietes und einer entsprechenden Untergliederung des Raumes mittels Straßen in erschlossene, bebaubare Parzellen automatisiert zu lösen.

Zukünftig werden wir weiterhin an Fragestellungen arbeiten, die auf graphenbasierten Methoden beruhen. Insbesondere gilt es, die generierten Straßengraphen bzw. Straßennetze realistischer zu gestalten. Hierzu gehört insbesondere, Möglichkeiten zu schaffen, die Generierung durch Parameter steuern zu können. Wir können uns verschiedene Szenarien vorstellen, in denen diese Steuerparameter unterschiedlicher Herkunft sein müssen, z.B. bautechnischer, ökologischer oder auch sozialer Natur. Im weiteren Verlauf unserer Forschungstätigkeit werden wir uns auf soziale Steuerparameter konzentrieren. Insbesondere ist das Ziel, ein Softwaremuster zu entwickeln, mithilfe dessen die Neuplanung bzw. Erschließung eines Wohngebietes anhand der stadtplanerischen Leitbilder bezüglich der milieuspezifischen Zusammensetzung der Bevölkerung automatisiert durchgeführt werden kann. Hierfür müssen die für unterschiedliche Milieus spezifischen Kenngrößen für die Graphgenerierung als Steuerparameter einfließen.

## Referenzen

- Anders, F. (2007) Mustererkennung in Straßennetzwerken – Verfahren zur Interpretation von Vektordaten (Dissertation) , Leibniz Universität Hannover , Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 607.
- Anders, F., Koenig R., Steinhöfel J., Köhler H., & Kalisch D. (2010) Straßennetzwerkanalysen zur Unterstützung sozialräumlicher Untersuchungen - das Projekt CoMStaR. (Strobl, Josef, Blaschke, Thomas, Griesebner, Gerald, Ed.).Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg. 454-463.
- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., Porta, S. (2006) Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns. *Physical Review* E73, 066107.
- Diestel, R. (2005) Graph Theory. Third Edition. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Felsner, S. (2003) Geometric Graphs and Arrangements. Vieweg.
- Fritz, O. (2002) Programmieren statt Zeichnen – Kaisersrot. *archithese* 4/02, S. 14-19, Verlag Niggli AG, Zürich.
- Fritz, O., Braach, M. (2005) Kaisersrot – programmierter städtebaulicher Entwurf oder ein Parzellierungsautomat. Buchbeitrag in „Stadt spielt Stadt“, Friedrich, Katja (Ed) Thiem Verlag, Dresden, ISBN 3-937672-05-2.
- Hillier, B., Leaman, A., Stansall, P., Bedford, M. (1976) Space syntax. Environment and Planning B. - In: Planning and Design, vol. 3(2), S. 147-185.
- Hillier, B. (2007) Space is the machine: a configurational theory of architecture. - Web: <http://www.spacesyntax.com/tool-links/downloads/space-is-the-machine.aspx>.
- Jansen, D. (2006) Einführung in die Netzwerkanalyse: Grundlagen, Methoden, Forschungsbeispiele. 3 ed. VS Verlag, Wiesbaden.
- Marshall, S. (2005) Streets and Patterns. Spon Press, Taylor and Francis Group, London, New York.
- Parish, Y.I.H., Müller, P. (2001) Procedural Modeling of Cities. SIGGRAPH, Los Angeles, CA.
- Rose, A., Schwander, C., Czerkauer, C., Davidel, R. (2008) Space Matters.- In: Arch Plus, vol. 189, S. 32–37.
- Sun, J., Yu, X., Baciú, G., Green, M. (2002) Template-based generation of road networks for virtual city modeling. In VRST '02: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp. 33-40.
- Thomson, R., Richardson, D. (1999) The 'good continuation' principle of perceptual organization applied to the generalization of road networks. In: Proceedings of the ICA, Ottawa, Canada, Session 47B.